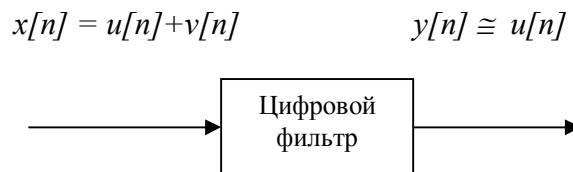


Лабораторная работа №3.

Автоматизированное проектирование цифровых фильтров.

1. Цифровые фильтры

Под цифровыми фильтрами, в общем случае, понимается цифровая система, осуществляющая извлечение цифрового сигнала или его параметров из действующей на входе фильтра смеси сигнала и помехи.



Где

$u[n]$ – сигнал;
 $v[n]$ – помеха;
 $x[n]$ – воздействие;
 $y[n]$ – реакция цифрового фильтра.

Сигнал на выходе цифрового фильтра соответствует исходному сигналу $x[n]$ или его параметрам с погрешностью, определяемой как алгоритмом цифровой фильтрации (тип фильтра, его порядок и т.п.) так и параметрами фильтра (разрядность, точность алгебраических вычислений).

Цифровые частотно-избирательные фильтры осуществляют селекцию цифровых сигналов по частоте. К таким фильтрам относятся фильтры нижних частот (ФНЧ), фильтры верхних частот (ФВЧ), полосовой и режекторный фильтры (ПФ и РФ).

Мы будем рассматривать линейные стационарные (см. лаб. раб. №2) частотно-избирательные фильтры. Кроме того, будем предполагать, что рассматриваемые фильтры являются физически реализуемыми.

Фильтр является физически реализуемым, если для него выполняется принцип причинности, то есть реакция фильтра не опережает соответствующее воздействие:

$$\text{из условия } \{x[n] = 0 \ \forall n < n_0\} \text{ следует, что } \{y[n] = 0 \ \forall n < n_0\}.$$

Как и любые линейные дискретные системы, цифровые фильтры распадаются на два класса: КИХ и БИХ фильтры.

Проектирование цифрового фильтра – это процесс, результатом которого является цифровое устройство (аппаратное, программное или программно-аппаратное), отвечающее заданным тактико-техническим характеристикам. Процесс проектирования состоит из следующих этапов:

1. задание требований к параметрам фильтра;
2. синтез соответствующей передаточной функции или разностного уравнения;

3. проверка синтезированного фильтра методом математического моделирования;
4. задание требований к техническим характеристикам разрабатываемого устройства;
5. практическая реализация на выбранной элементной базе и отладка.

Настоящая лабораторная работа посвящена изучению первых трех пунктов процесса разработки цифровых фильтров.

2. Требования, предъявляемые к частотно-избирательным цифровым фильтрам.

При проектировании частотно-избирательных фильтров определяют частоту дискретизации f_d и предъявляют требования к виду амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) в основной полосе частот $(0, f_d/2)$. Идеальные амплитудно-частотные характеристики частотно-избирательных фильтров представлены на рисунках 2.1 – 2.4.

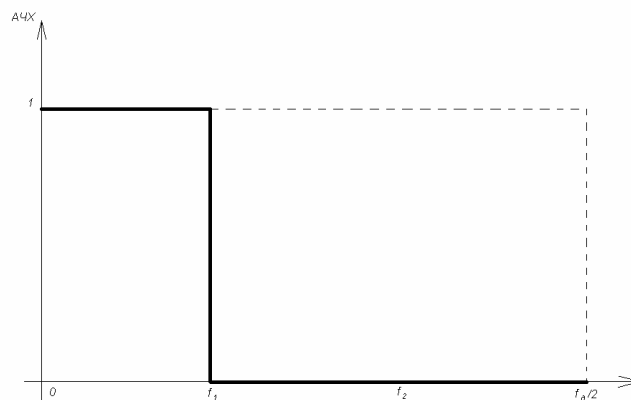


Рис. 2.1. АЧХ идеального ФНЧ.

Полосой пропускания идеального фильтра нижних частот является область $(0, f_1)$, а полосой задерживания – область $(f_1, f_d/2)$.



Рис. 2.2. АЧХ идеального ФВЧ.

Полосой пропускания идеального фильтра верхних частот является область $(f_2, f_{\partial}/2)$, а полосой задерживания – область $(0, f_2)$.

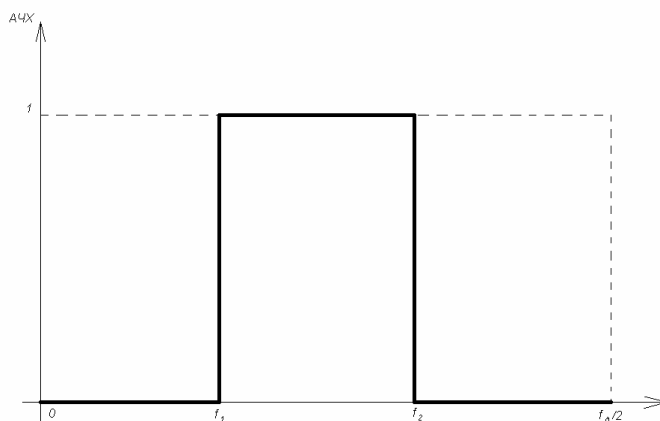


Рис. 2.3. АЧХ идеального ПФ.

Полосой пропускания идеального полосового фильтра является область (f_1, f_2) , а полосой задерживания – область $(0, f_1) \cup (f_2, f_{\partial}/2)$.

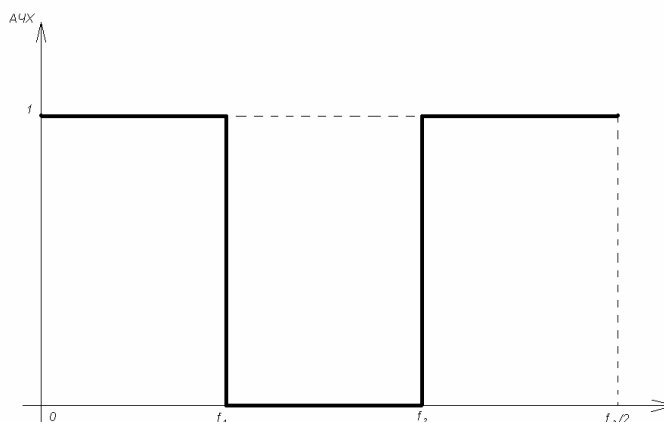


Рис. 2.4. АЧХ идеального РФ.

Полосой пропускания идеального режекторного фильтра является область $(0, f_1) \cup (f_2, f_{\partial}/2)$, а полосой задерживания – область (f_1, f_2) .

Идеальные частотно-избирательные фильтры являются физически нереализуемыми, что приводит к необходимости пересмотра требований к физически реализуемым цифровым фильтрам. Для этого вводят допустимые отклонения АЧХ синтезируемого фильтра в полосах пропускания и задерживания от АЧХ идеального фильтра. Кроме того, вводят дополнительные, так называемые переходные полосы, расположенные между полосами пропускания и задерживания в которых требования к АЧХ

синтезируемого фильтра не предъявляют. Пример требований к АЧХ полосового фильтра, а также допустимая АЧХ показаны на рисунке 2.5.

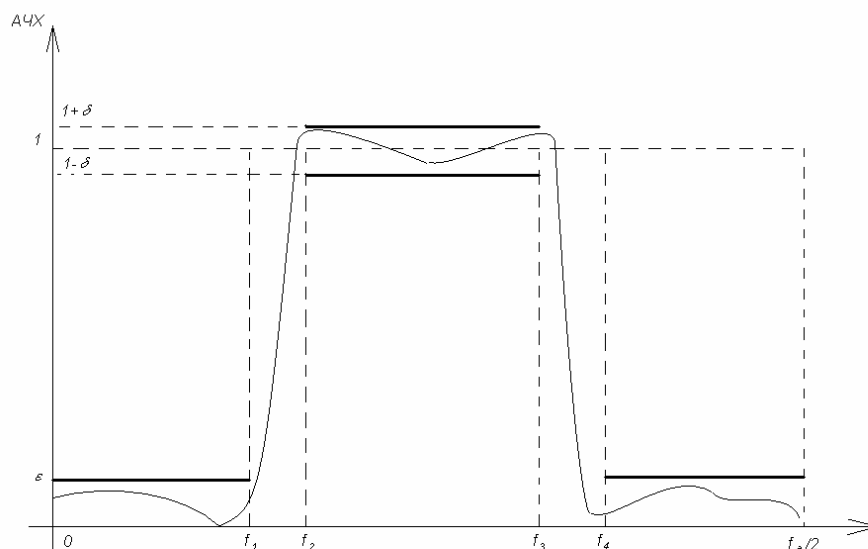


Рис. 2.5. Требования, предъявляемые к ПФ.

В полосе пропускания (f_2, f_3) допускают отклонение АЧХ от единицы на величину δ . В полосах задерживания ($0, f_1$) и ($f_4, f_d/2$) допускают отклонение АЧХ от нуля на величину ϵ . Дополнительно к полосам пропускания и задерживания вводят переходные полосы (f_1, f_2) и (f_3, f_4), в которых требования к АЧХ синтезируемого фильтра не предъявляются. Аналогичным образом задаются требования и к другим частотно-избирательным фильтрам.

В общем случае требования к синтезируемому частотно-избирательному фильтру включают следующие параметры:

1. тип избирательности фильтра (ФНЧ, ФВЧ, ПФ и т.п.);
2. частота дискретизации f_d ;
3. значения граничных частот (в основной полосе частот), разделяющих полосы пропускания, задерживания, а также переходные полосы;
4. допустимые отклонения АЧХ синтезируемого фильтра от идеальной АЧХ в полосах пропускания (δ) и задерживания (ϵ);
5. выбор метода аппроксимации АЧХ.

Указанные требования могут предъявляться как к нормированной амплитудно-частотной характеристике $A(f) \in [0, 1]$, так и к характеристике затухания $a(f) = 20 \log A(f) \in (-\infty, 0]$.

3. Методы синтеза БИХ фильтров.

4. Методы синтеза КИХ фильтров.

5. Автоматизированное проектирование фильтров.

В настоящей лабораторной работе рассматривается автоматизированное проектирование цифровых фильтров на примере пакета Signal Processing Toolbox из состава программного комплекса MatLab. Вызов пакета Signal Processing Toolbox (SPTool) осуществляется с помощью команды `sptool`, вводимой в основном командном окне программы MatLab, как это показано на рисунке 5.1.

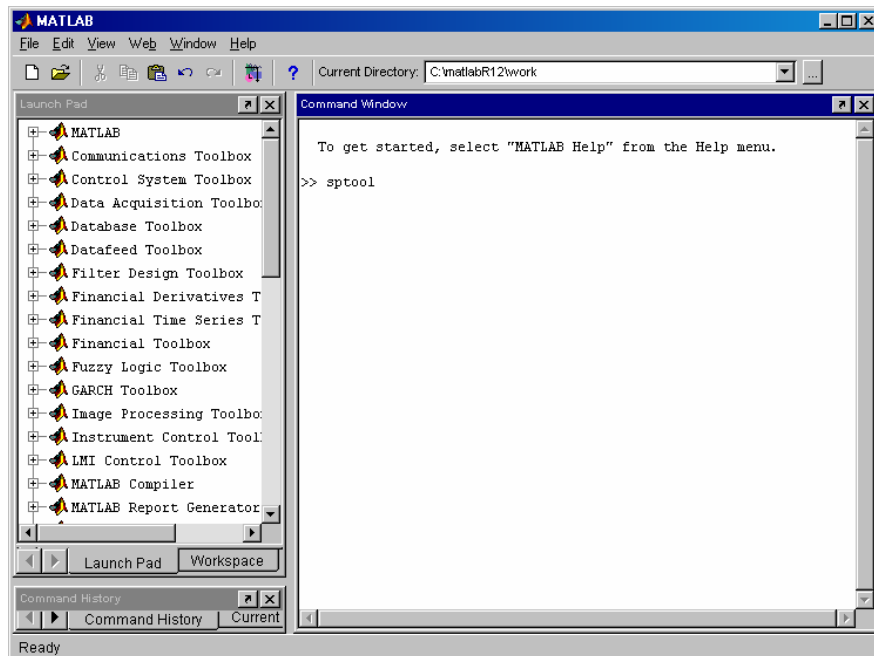


Рис.5.1. Запуск пакета Signal Processing Toolbox.

В результате введенной команды на экране компьютера должно отобразиться окно для работы с пакетом SPTool, представленное на рисунке 5.2.

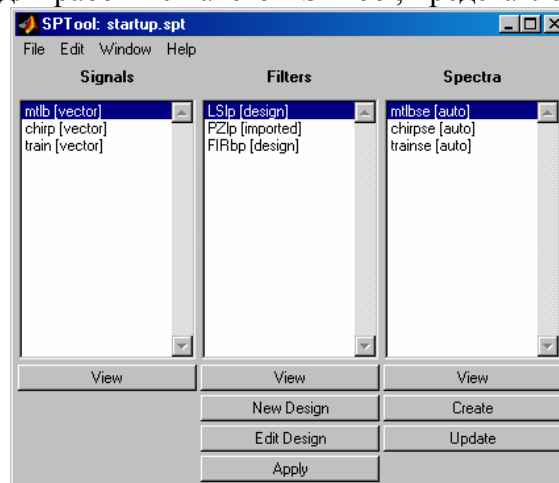


Рис.5.2. Пакет SPTool.

Окно SPTool состоит из строки меню и трех полей: Signals, Filters и Spectra. Поля Signal и Spectra предназначены для расчета и просмотра спектров сигналов на входе и выходе синтезированного фильтра.

Поле Filters предназначено для автоматизированного процесса синтеза цифрового фильтра. Кнопка View предназначена для просмотра характеристик

существующего фильтра, кнопка New Design предназначена для синтеза нового фильтра, кнопка Edit Design предназначена для изменения характеристик существующего (выделенного) фильтра и кнопка Apply предназначена для моделирования процесса фильтрации (с помощью выделенного фильтра).

Рассмотрим процесс автоматизированного синтеза фильтра. Для этого в поле Filters нажмем на кнопку New Design. При этом на экране должно отобразиться окно «Filter Design», представленное на рисунке 5.3.

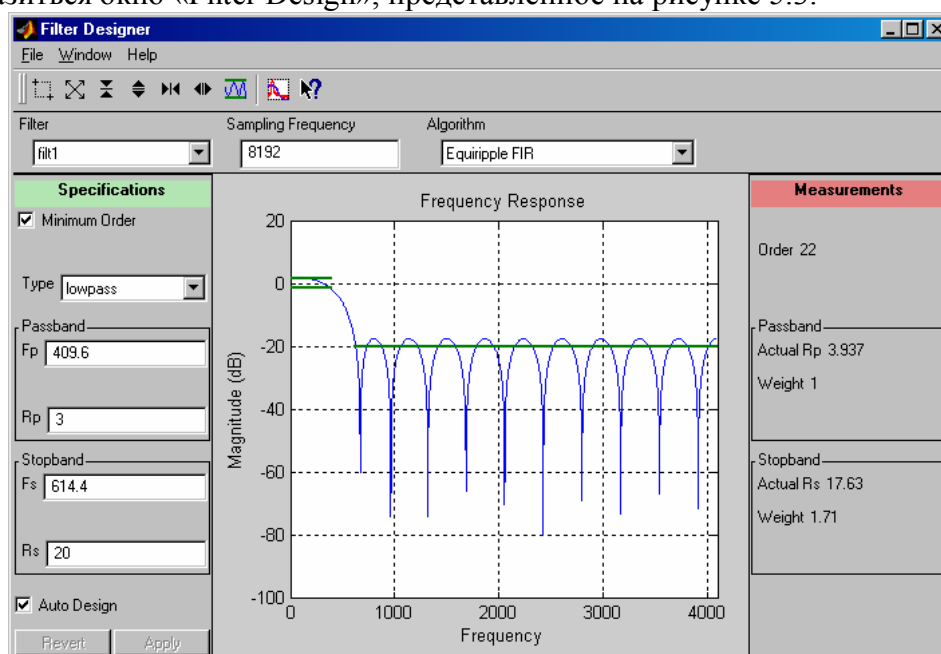


Рис.5.3. Окно «Filter Design»

Поле «Filter» содержит имя фильтра.

Поле «Sampling Frequency» содержит значение частоты дискретизации.

Поле «Algorithm» отображает выбранный алгоритм аппроксимации:

- Equiripple FIR – оптимальный фильтрации Чебышева (КИХ);
- Least Squares FIR – метод наименьших квадратов (КИХ);
- Kaiser Window FIR – окно Кайзера (КИХ);
- Butterworth IIR – фильтр Баттерворта (БИХ);
- Chebyshev Type 1 IIR – фильтр Чебышева 1-го рода (БИХ);
- Chebyshev Type 2 IIR – фильтр Чебышева 2-го рода (БИХ);
- Elliptic IIR – фильтр Золотарева – Кауэра (эллиптический) (БИХ);
- Pole/Zero Editor – синтез фильтра методом задания полюсов и нулей передаточной функции в Z-области.

Флажок «Minimum Order» служит для синтеза фильтра минимального порядка, удовлетворяющего введенным требованиям.

Поле «Type» содержит информацию о типе избирательности фильтра:

- lowpass – ФНЧ;
- highpass – ФВЧ;
- bandpass – ПФ;
- bandstop – РФ.

Поля «Passband» и «Stopband» служат для ввода параметров полос пропускания и задерживания соответственно. Подполя «Fp1 (Fp2)» и «Fs1 (Fs2)» служат для ввода границ полос пропускания и задерживания, а подполя «Rp» («Rs») служат для ввода максимально (минимально) допустимого ослабления в полосе пропускания (задерживания).

После ввода требований к синтезируемому фильтру необходимо нажать на флажок «Auto Design» для автоматического расчета цифрового фильтра. При успешном выполнении расчета в поле «Frequency Response» отобразится АЧХ синтезированного фильтра.

На рисунке 5.4 представлены результаты синтеза полосового фильтра со следующими параметрами:

1. частота дискретизации: 8000 Гц;
2. полоса пропускания
область: (800, 1200);
максимально допустимое ослабление: 6 dB;
3. полоса пропускания
область: (0, 600) U (1400, 4000);
минимально допустимое ослабление: 40 dB;
4. метод аппроксимации: БИХ фильтр Баттерворта.

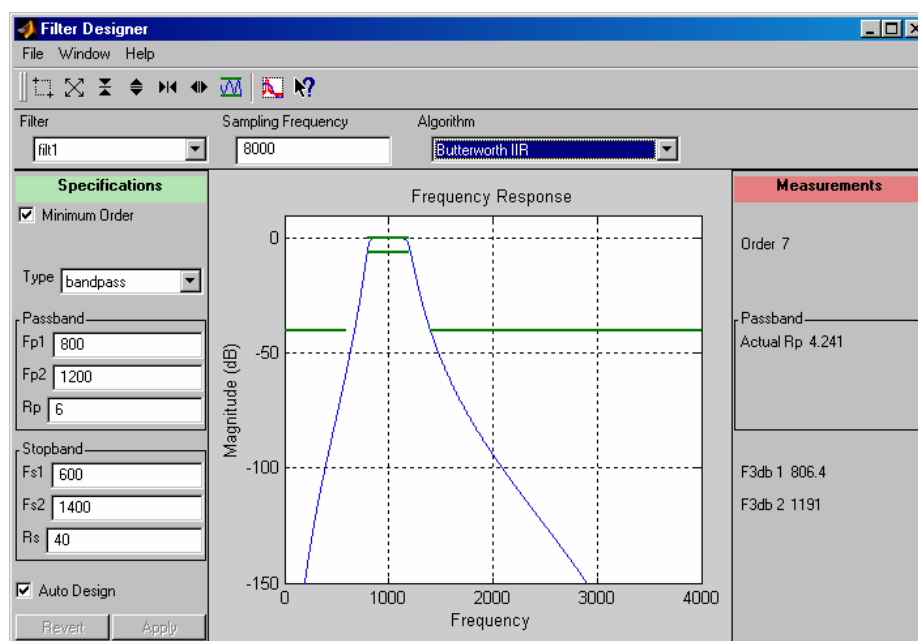


Рис.5.4. Результаты синтеза полосового фильтра.

В правой части окна в поле «Measurements» отображается порядок (Order) синтезированного фильтра. В нашем случае он оказался равен 7-ми.

Для анализа характеристик синтезированного фильтра необходимо закрыть окно «Filter Design» с помощью пункта меню «File/Close» и в окне «SPTool» (см. рис.5.2) нажать кнопку «View». При этом на экране отобразится диалоговое окно «Filter Viewer», позволяющее просмотреть следующие характеристики синтезированного фильтра:

- АЧХ в линейном и логарифмическом масштабах (Magnitude);
- ФЧХ (Phase);

- время группового прохождения (Group Delay);
- карту нулей и полюсов (Zeros & Poles);
- импульсную характеристику (Impulse Response);
- переходную характеристику (Step Response).

Характеристики синтезированного фильтра представлены на рисунке 5.5.

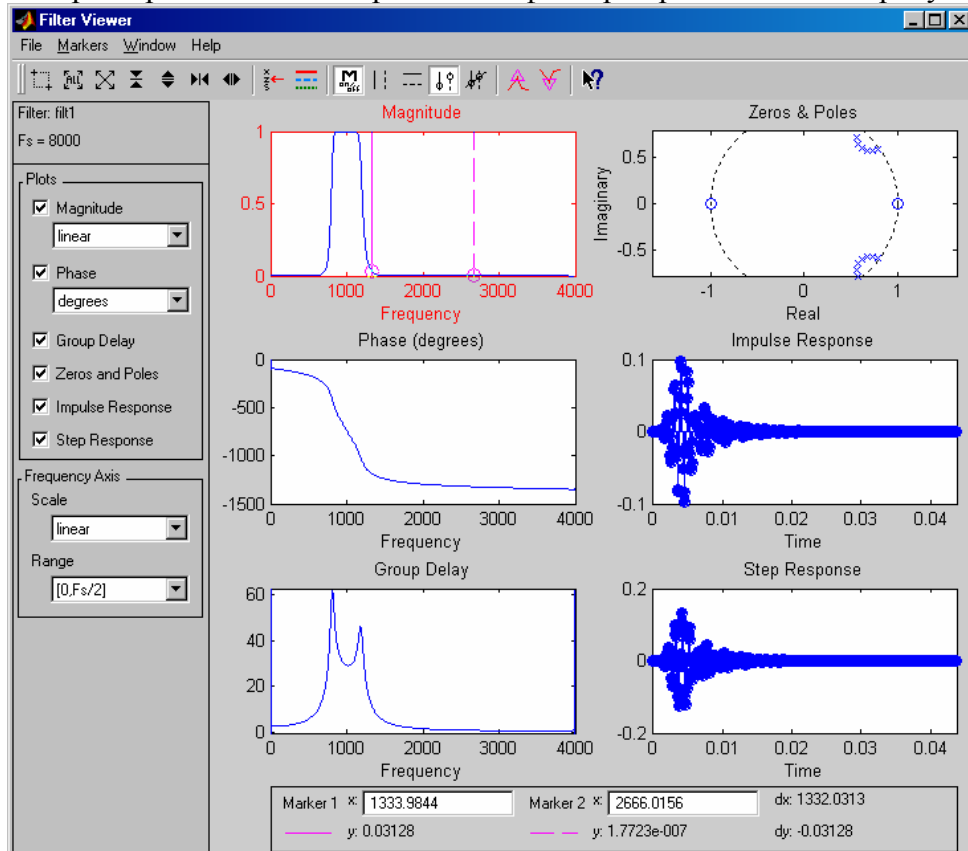


Рис.5.5. Характеристики синтезированного фильтра.

Для экспортирования синтезированного фильтра в программу MatLab необходимо в окне «SPTool» (см. рис. 5.2) выбрать пункт меню «File\Export...». При этом на экране отобразиться окно «Export from SPTool», представленное на рис. 5.6.

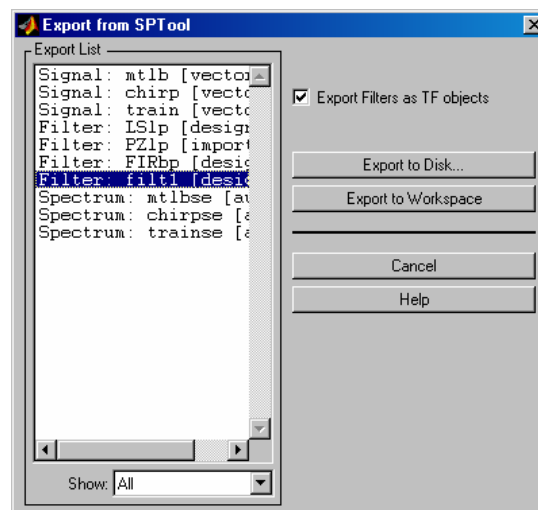


Рис. 5.6. Окно «Export from SPTool».

В поле «Export List» необходимо:

- выбрать имя синтезированного фильтра (в нашем примере это «filt1»);
- установить флажок «Export Filters as TF objects»;
- нажать кнопку «Export to Workspace».

После экспортирования фильтра в программу MatLab можно просмотреть передаточную функцию синтезированного фильтра, напечатав имя фильтра (filt1) в основном командном окне программы, как это показано на рис.5.7.

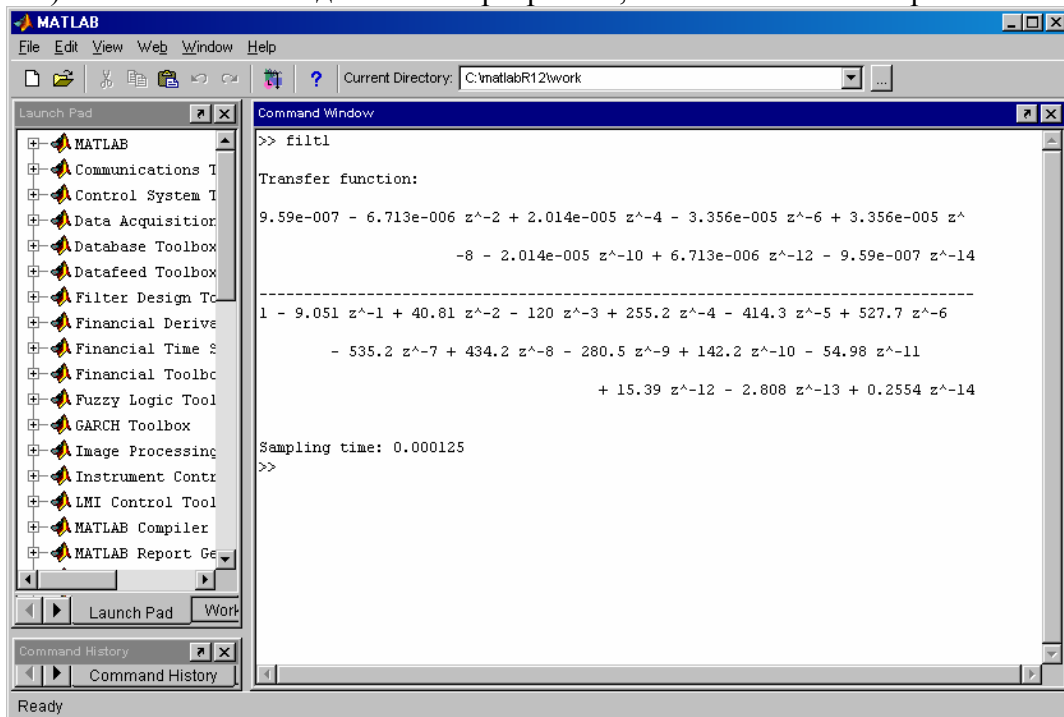


Рис.5.7. Вывод передаточной функции в командное окно MatLab.

После введенного имени фильтра программа отображает аналитическое выражение передаточной функции синтезированного фильтра.

Синтез цифровых фильтров с другим типом частотной избирательности и методом аппроксимации АЧХ проводится аналогично рассмотренному примеру синтеза полосового фильтра методом Баттерворта.

6. Задания для выполнения лабораторной работы

В ходе лабораторной работе необходимо синтезировать с помощью пакета SPTool линейные КИХ и БИХ фильтры. Задание на проектирование КИХ фильтра содержится в таблице № 1, задание на проектирование БИХ фильтра содержится в таблице №2. Во всех вариантах частота дискретизации должна быть равна 8 кГц.

Таблица №1

№	Тип фильтра	Параметры полосы пропускания	Параметры полосы задерживания	Метод аппроксимации
1	ФНЧ	(0, 1000) max ослабл.: 6 dB	(1400, 4000) min ослабл.: 40 dB	БИХ фильтр Баттерворта
2	ФНЧ	то же	то же	БИХ фильтр Чебышева 1 р.
3	ФНЧ	то же	то же	БИХ фильтр Чебышева 2 р.
4	ФНЧ	то же	то же	БИХ фильтр Кауэра
5	ФВЧ	(1400, 4000) max ослабл.: 6 dB	(0, 1000) min ослабл.: 40 dB	БИХ фильтр Баттерворта
6	ФВЧ	то же	то же	БИХ фильтр Чебышева 1 р.
7	ФВЧ	то же	то же	БИХ фильтр Чебышева 2 р.
8	ФВЧ	то же	то же	БИХ фильтр Кауэра
9	ПФ	(800, 1200) max ослабл.: 6 dB	(0, 600) U (1400, 4000) min ослабл.: 40 dB	БИХ фильтр Баттерворта
10	ПФ	то же	то же	БИХ фильтр Чебышева 1 р.
11	ПФ	то же	то же	БИХ фильтр Чебышева 2 р.
12	ПФ	то же	то же	БИХ фильтр Кауэра
13	РФ	(0, 600) U (1400, 4000) max ослабл.: 6 dB	(800, 1200) min ослабл.: 40 dB	БИХ фильтр Баттерворта
14	РФ	то же	то же	БИХ фильтр Чебышева 1 р.
15	РФ	то же	то же	БИХ фильтр Чебышева 2 р.
16	РФ	то же	то же	БИХ фильтр Кауэра

Таблица №2

№	Тип фильтра	Параметры полосы пропускания	Параметры полосы задерживания	Метод аппроксимации
1	ФНЧ	(0, 1000) max ослабл.: 6 dB	(1400, 4000) min ослабл.: 40 dB	оптимальный фильтр Чебышева
2	ФНЧ	то же	то же	метод наименьших квадратов
3	ФНЧ	то же	то же	Окно Кайзера
4	ФНЧ	(0, 1200) max ослабл.: 6 dB	(1400, 4000) min ослабл.: 40 dB	оптимальный фильтр Чебышева
5	ФВЧ	(1400, 4000) max ослабл.: 6 dB	(0, 1000) min ослабл.: 40 dB	оптимальный фильтр Чебышева
6	ФВЧ	то же	то же	метод наименьших квадратов
7	ФВЧ	то же	то же	Окно Кайзера
8	ФВЧ	(1400, 4000) max ослабл.: 6 dB	(0, 1200) min ослабл.: 40 dB	метод наименьших квадратов
9	ПФ	(800, 1200) max ослабл.: 6 dB	(0, 600) U (1400, 4000) min ослабл.: 40 dB	оптимальный фильтр Чебышева
10	ПФ	то же	то же	метод наименьших квадратов
11	ПФ	то же	то же	Окно Кайзера
12	ПФ	(800, 1200) max ослабл.: 6 dB	(0, 600) U (1200, 4000) min ослабл.: 40 dB	Окно Кайзера
13	РФ	(0, 600) U (1400, 4000) max ослабл.: 6 dB	(800, 1200) min ослабл.: 40 dB	оптимальный фильтр Чебышева
14	РФ	то же	то же	метод наименьших квадратов
15	РФ	то же	то же	Окно Кайзера
16	РФ	(0, 600) U (1200, 4000) max ослабл.: 6 dB	(800, 1200) min ослабл.: 40 dB	оптимальный фильтр Чебышева

Отчет по выполненной лабораторной работе должен содержать следующие данные синтезированных фильтров:

- передаточную функцию;
- график АЧХ;
- график ФЧХ;
- время группового прохождения;
- карту нулей и полюсов, а также заключение об устойчивости фильтра;
- импульсную характеристику;
- переходную характеристику;
- структурную схему фильтра.